第41卷 第10期
2024年10月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 10
Oct. 2024

1961—2022年祁连山气候特征及其变化

杨 斐， 张文韬， 张飞民， 王澄海

（甘肃省气候资源开发及防灾减灾重点实验室，兰州大学大气科学学院，甘肃 兰州 730000）

摘 要：随着全球变暖，中国西北地区出现了暖湿化现象。祁连山地处西北干旱区，东西跨越干旱、半干旱和极干旱气候区，气候也发生了明显变化，对区域生态及水文过程产生了显著的影响。本文基于1961—2022年祁连山以及周边地区常规气象站及雨量站观测的气温降水资料，分析了祁连山气温降水的时空变化特征以及降水与海拔的关系。结果表明：祁连山气温和降水在60 a来呈显著增加趋势，气温年际变化在祁连山中段最大，降水年际变化在祁连山东段最大，在西段最小，山区降水年际变率最大出现在8月。祁连山地区气温增加倾向率约0.36 ℃·(10a)$^{-1}$，高于全国水平0.21 ℃·(10a)$^{-1}$，冬季升温速率最大为0.45 ℃·(10a)$^{-1}$，西段区域升温速率最大为0.5 ℃·(10a)$^{-1}$；中段区域降水增加速率最大为11.86 mm·(10a)$^{-1}$。祁连山以及周边地区降水增加速率随海拔高度增加。山区降水存在两个峰值，夏季降水量极大值出现在海拔2600~2800 m的高度带，海拔3600~3800 m出现第二个峰值。不同山系降水量随海拔变化大多呈单峰型分布；其中达坂山迎风坡降水量最大，青海南山降水量最小。祁连山地区的气候总体上呈现出暖湿化倾向。年平均最低温度的增加快于最高温度的增加趋势，最低温度在祁连山西段增加最为明显，最低气温的快速上升会对祁连山冰川、生态系统产生影响。

关键词：气温；降水；气候变化；时空特征；变化趋势；祁连山

根据IPCC第六次评估报告，2011—2020年全球地表温度比1850—1900年上升了1.09 ℃[1]，极端天气事件愈加频繁和强烈，使全球自然环境和人类日益陷入危机之中。

中国西北干旱区水资源和生态环境十分脆弱，对全球气候变化的响应尤其敏感[2]。西北地区干旱少雨，在全球变暖背景下，降水量和大气中的含水量均呈现出增加趋势[3-5]，20世纪60年代以来，西北干旱区呈变暖变湿趋势[6-8]，冬季增暖最为显著，春季次之[9]。研究发现，1961—2010年，西北干旱区各季节降水均呈增加的趋势，蒸发增大和水汽辐合增强是西北干旱区降水增加的主要原因[10]。研究表明，中国将继续保持增暖趋势,北方地区和青藏高原的升温要大于除西南地区外的南方地区[11]。

祁连山地区位于中国西北干旱区，东部湿润区和青藏高原区过渡地带，属温带半干旱区，地跨甘肃青海两省，平均海拔4000~4500 m，整体地形为西高东低,受大陆性气候和高原气候的综合影响，具有典型的大陆性气候和高原气候特征。研究指出，受全球变暖和人类活动的影响，1961—2017年祁连山地区的气温和降水分别以0.35 ℃·(10a)$^{-1}$和14.7 mm·(10a)$^{-1}$的趋势显著上升，与此同时，冰川持续萎缩，出山径流增加[12]。祁连山绿洲和山区降水量分别增加了4.1 mm·(10a)$^{-1}$和8.9 mm·(10a)$^{-1}$[13]。研究还表明，祁连山地区多年平均气温、最高气温与最低气温的变化趋势均为上升趋势，多年平均降水量、最大值呈波动上升的趋势，最小值呈下降趋势，气温和降水的季节性变化趋势相一致，均为持续上升，且冬季上升最为显著，二者的年代际演化在20世纪90年代呈现出持续上升的趋势[14]。位于祁连山西部的疏勒河流域各站平均气温均呈显著上升趋势[15]，总体上，祁连山的平均气温呈缓慢波动上升趋势，但升温幅度不是很大[16]。祁连山呈西北-东南向分布，东西不同地段受到夏季风的影响不同，气候变化也呈现出较大差异。祁连山中段升温和增湿率较东、西段大，祁连山中段可能是气候变化较为敏

收稿日期：2024-02-06； **修订日期：**2024-06-18

基金项目：国家自然科学基金项目（42175064）；甘肃省重点研发计划项目（23YFFA0001）；甘肃省重大科技项目（20ZD7FA005）

作者简介：杨斐（1992-），硕士，主要从事气候变化研究. E-mail: yangf21@lzu.edu.cn

通讯作者：王澄海. E-mail: wch@lzu.edu.cn

感的区域[17]。祁连山东段受夏季风和翻越青藏高原的西南季风影响降水的阶梯分布明显，西段受夏季风影响较小[18]，干旱少雨。降水主要集中在夏季，年降水量由东向西逐渐减少[19]。可见，祁连山横跨干旱和半干旱区，地形地貌复杂，自东向西气候特征差异明显。祁连山不同山系、东西不同地段受控于不同的夏季风和环流，气候变化的特征仍然需要进一步的分析和理解。

观测和研究均表明，随着全球气候变化，极端天气气候事件也显著增加(IPCC)。已有研究表明，祁连山及河西走廊极端高温天气呈增多趋势，极端低温天气呈减少趋势[20]。祁连山地区水汽较难到达，但山区降水丰富，给祁连山带来了丰富的水资源，但地形差异也影响水凝物和降水分布的不均匀[21]。祁连山降水和海拔之间的垂直分布关系是一个基本而又重要的科学问题，研究表明，祁连山降雨日数和降雨总量在海拔3700 m左右达最大峰值，而在海拔2700 m附近为次大峰值[22]。冬季最大降水高度为2300 m，其他季节和每年的最大降水高度为4200 m，从冷干季到暖湿季，最大降水高度增加[23]。河西走廊南山北坡的寺大隆林区降水量递增率在海拔高度2600~3800 m之间出现两个高峰，在2800 m左右出现第一个降水高峰，3400~3600 m又出现高峰[24]。祁连山自然保护区降水在海拔2910 m左右，迎风坡一面存在降水高值区，其降水量大于500 mm[25]。但上述研究结果都是一个山系或者较短时间的观测得到的，随着气象雨量站的增设，山区降水随海拔变化的垂直变化关系也应该继续深入。

祁连山是我国重要的生态功能区、西部重要的生态安全屏障和水源涵养地，是我国生物多样性保护的优先区域。其次，祁连山动植物，水源和积雪冰川等变化与气温和降水的变化有密切的联系[26-27]，因此，研究祁连山气候变化有助于西部地区的生态安全及可持续发展。

本文收集了祁连山地区近60 a气象站观测资料，增加了近年来的雨量站观测资料，将祁连山区划分为祁连山东段、中段、西段，对祁连山气温降水的空间变化特征、时间变化趋势、以及山区降水垂直分布特征进行分析。加深对祁连山地区气候变化的理解和认识。

1 资料与方法

祁连山区(36°~40°N，93°~104°E，图1)是青藏高原东北部最大的边缘山系，由一系列西北-东南走向的平行山脉与谷地组成，东起乌鞘岭，西至当金山口，南靠柴达木盆地，北临河西走廊，长约800 km，宽约300 km[28]。本文选取祁连山及周边地区气象站点1961—2022年逐日平均气温、累积降水资料，数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/)，并经过了

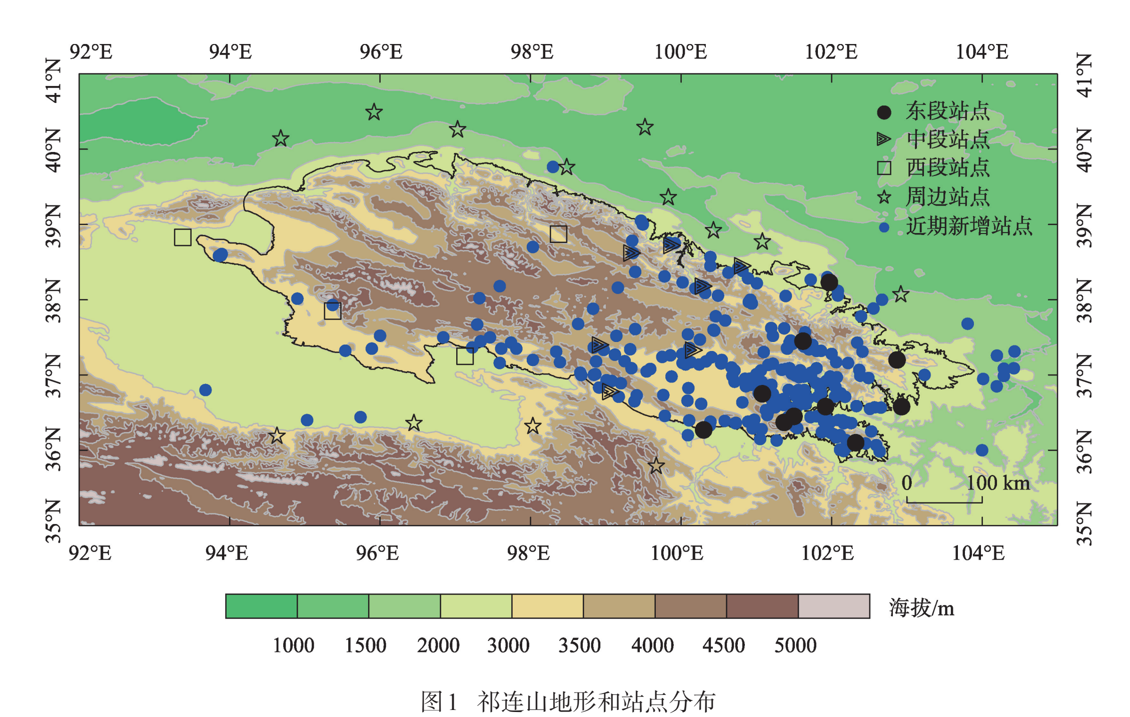


图1 祁连山地形和站点分布

Fig.1 Topography of Qilian Mountains and site distribution

质量控制和均一性检验。本研究对祁连山气温和降水量的季节进行了划分,分为4个季节,即春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12月至翌年2月)。将气象站的气温和降水量数据进行处理后,为更好地表现气温降水的空间分布,采用径向基函数对资料进行插值,利用一元线性趋势分析法,分析气温和降水的年际、季节变化趋势,并对结果进行了显著性检验。

祁连山地区地形起伏较大,气温和降水变化空间差异显著,为了研究祁连山不同区域的气候特征,本文在34个站点中筛选出海拔>1800 m的21个站点(表1)作为祁连山研究区域的代表站。根据降水量年际变化分布特征和站点的地理空间分布以及已有的研究[29-30],将祁连山地区划分为祁连山东段、中段、西段三个区域,分析各区域的气温降水的变化。

表1　祁连山东段、中段、西段有近60 a降水气温观测的站点

Tab. 1　Distribution of stations in the eastern, middle, and western Qilian Mountains in the past 60 years

分区	站点
东段	乌鞘岭,民和,化隆,永昌,门源,西宁,湟源,湟中,贵德,共和
中段	民乐,肃南,野牛沟,祁连,刚察,茶卡,天峻
西段	冷湖,大柴旦,托勒,德令哈

2　祁连山地区气温降水的时空分布特征

由于祁连山地形起伏较大,气温和降水的空间变化显著。为了分析祁连山区气温的变化,图2给出了祁连山区气温的多年平均和标准差分布图,由图可见,祁连山气温与地形有关,在空间分布上随着海拔高度的增加而降低,在祁连山中段海拔可达4000 m,年平均气温低于0 ℃。气温年际变化(标准差)较大的区域位于祁连山南麓,达到0.9 ℃,气温年际变化(标准差)最大的区域位于祁连山中段民乐地区附近,最大值达到1.1 ℃,年际变化最小的区域位于肃南地区,为0.6 ℃;从气温标准差来看,不同季节和年平均都呈现出气温年际变化最大中心位于祁连山以北和祁连山西南部,气温年际变化最小中心位于祁连山东南部的特点。这可能与下垫面类型有关,祁连山西南和以北地区以荒漠为主,植被稀疏。在植被生长相对较好的地区,气温标准差小,即气温变化稳定,从季节变化上来看,冬季气温年际变化(标准差)最大达到1.8 ℃,远高于其他季节的1.1 ℃,夏季年际变化(标准差)最小,表明在全球变暖的大背景下,祁连山的夏季温度较为稳定,变化较小,冬季气温的变化最为显著。

祁连山区降水是河西地区水资源的主要来源[31-32]。为了研究祁连山地区降水变化,图3给出了祁连山区降水量的多年平均和标准差的空间分布。从降水量来看,祁连山全年降水中心位于祁连山东段湟中地区(可达500 mm),降水中心大值区向西延伸,随海拔高度的降低依次递减。祁连山全年夏季降水最多,降水量占全年降水量的60%以上,春秋次之,冬季降水量最少。全年降水分布主要受夏季降水分布的影响,呈现与山系走向有关的分布形态,最大中心位于祁连山东南部,最小中心位于西北部。冬季降水分布与其他季节略有不同,最大中心位于东南和东北部。这是由于祁连山地区受到夏季风活动的影响,在夏季从祁连山东南方向带来充沛的水汽,受地形抬升作用,水汽凝结产生大量降水,在冬季水汽输送不足,降水减少。从降水标准差来看,夏季降水年际变化(标准差)大于冬季,夏季降水变化幅度大。降水标准差分布与降水分布基本一致,都呈现东南向西北递减的分布,但是仍然存在差异,全年降水的年际变化最大中心位于祁连山中段(可达60 mm)和东南部(可达70 mm),标准差和年平均比值约为25%,说明祁连山地区降水年际变化幅度大,气温变化幅度大的祁连山西段区域只有冬季降水年际变化明显,其他季节的年际变化均不显著。

为了分析祁连山不同区域降水的年内变化特征,图4给出了祁连山以及祁连山不同区域内降水的逐月变化,由图可见,夏季(6月、7月、8月)是祁连山区域全年降水的主要贡献时段,降水量为全年的60%,祁连山地区的月降水存在明显的年内变化,春季降水量大于秋季,7月降水量最大达到72 mm,12月降水量最小为1 mm,8月降水量和7月接近,8月降水量年际变化(标准差)最大达到17 mm·a^{-1},12月降水量年际变化(标准差)最小。祁连山东段降水最大月份是8月,而祁连山中段和西段降水在7月达到峰值,祁连山东段月降水最大值为84 mm,中段

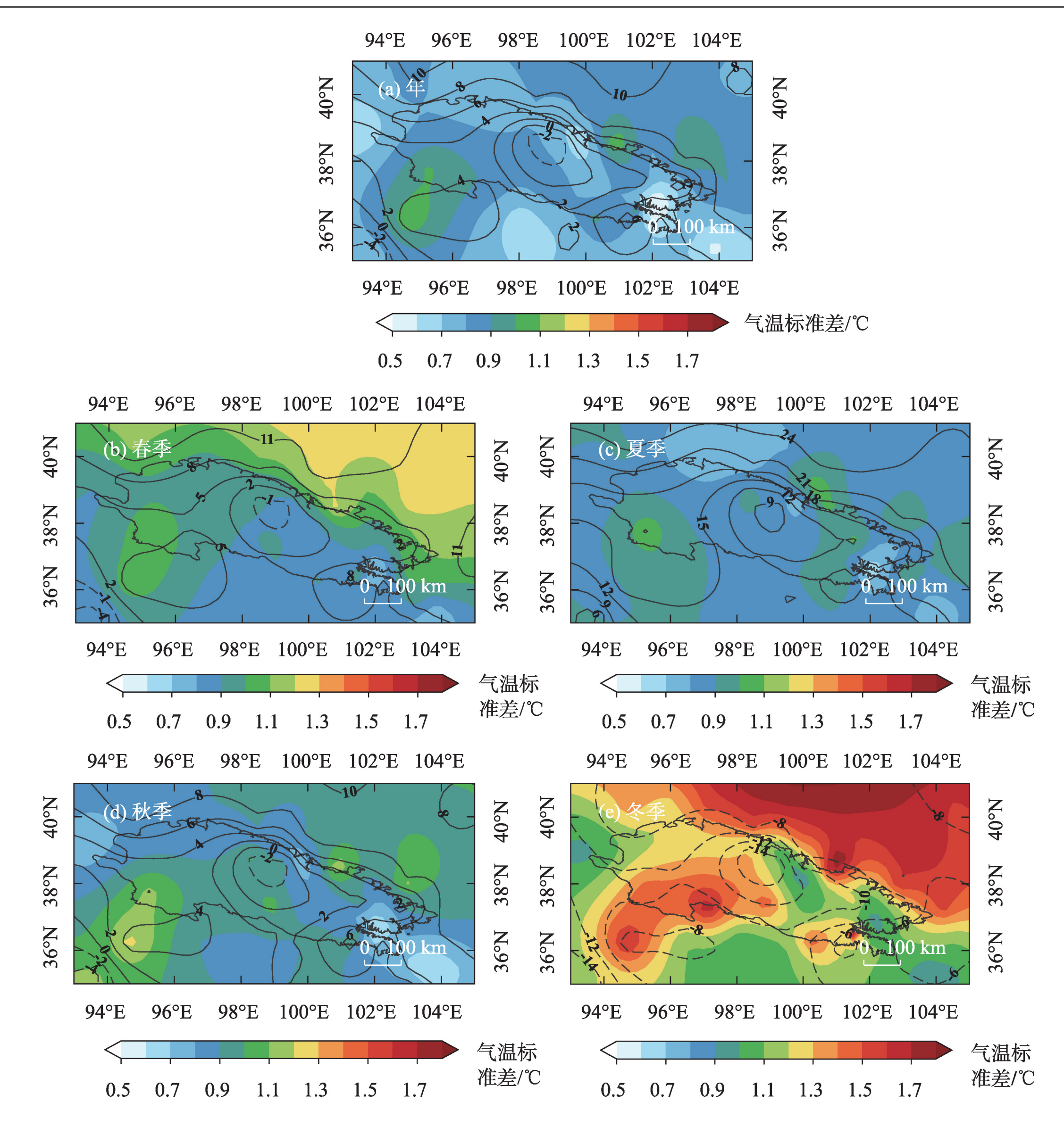


图2 1961—2022年祁连山平均气温(等值线,单位:℃)和气温标准差(填色,单位:℃)

Fig. 2 Temperature (isoline, unit: ℃) and its standard deviation (shading, unit: ℃) in the Qilian Mountains from 1961 to 2022

月降水最大值为81 mm,西段月降水最大值为39 mm,东段月降水年际变化(标准差)在8月达到最大值25 mm·a^{-1},7月和5月降水年际变化(标准差)均达到19 mm·a^{-1},中段月降水年际变化(标准差)在8月达到最大值19 mm·a^{-1},9月次之,西段月降水年际变化最小,7月达到最大值16 mm·a^{-1},祁连山冬季少雨,各区域的冬季降水以及年际变化不大,因此,祁连山东段月降水年际变化最大,西段最小。

3 祁连山气温和降水过去60 a的变化特征

为了研究气温和降水在过去60 a间的变化规律,图5给出了1961—2022年祁连山及周边地区年平均气温降水的变化趋势的空间分布图。由图可见,气温均呈增加的趋势,并通过了信度为95%的显著性检验(图5a)。气温显著升高的区域主要集中在祁连山东段和西段南部地区,气温增加最显著的区域在民乐、湟中、大柴旦、格尔木站点周边。升温幅度最大的站点达到0.54 ℃·(10a)$^{-1}$,升温幅度最小地区在西宁,仅为0.12 ℃·(10a)$^{-1}$,大部分站点的气温增加速率接近0.3 ℃·(10a)$^{-1}$。祁连山地区年降水量的变化总体处于上升的趋势,34个站点中33个站点降水呈上升趋势,仅有1个站点呈下降趋势,位于祁连山东段边界处,其中有19个站点通过了90%的显著性检验,通过显著性检验的站点占比为

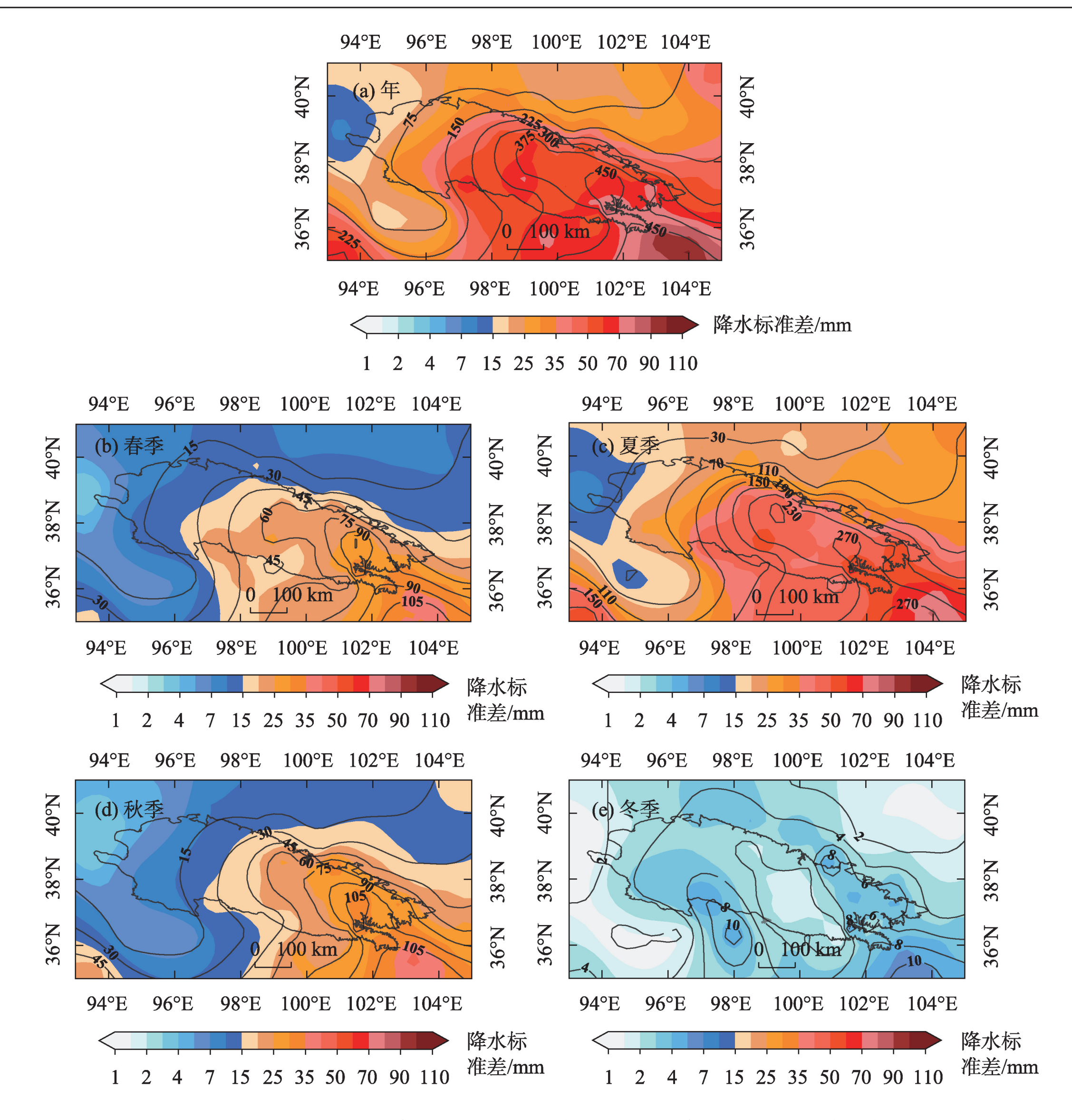


图3 1961—2022年祁连山降水量(等值线,单位:mm)和降水标准差(填色,单位:mm)

Fig. 3 Precipitation (isoline, unit: mm) and standard deviation of precipitation (shading, unit: mm) in the Qilian Mountains from 1961 to 2022

56%。年降水量显著增加且通过显著性检验的站点主要集中在祁连山中段地区,达到17.5 mm·(10a)$^{-1}$,结合温度和降水的变化,可以看到祁连山地区总体上呈现出暖湿化倾向。

祁连山气温降水增加倾向率如表2所示,其中整个山区气温增加速率为0.36 ℃·(10a)$^{-1}$,高于全国水平0.21 ℃·(10a)$^{-1}$[33],春季升温速率最小,冬季升温速率最大,达到0.45 ℃·(10a)$^{-1}$,整个山区降水增加倾向率为9.94 mm·(10a)$^{-1}$,高于中国西部地区2.1 mm·(10a)$^{-1}$的降水增加速率[34],其中祁连山中段降水增加速率最大,达到11.86 mm·(10a)$^{-1}$。

如图6所示,祁连山区平均最低气温由东向西呈现逐渐降低的趋势,祁连山不同区域站点平均最低气温呈现显著增加的趋势,祁连山区(图6a)增加速率为0.59 ℃·(10a)$^{-1}$,明显高于同区域平均气温的增加速率,祁连山东段最低气温增加速率为0.54 ℃·(10a)$^{-1}$,中段增加速率为0.6 ℃·(10a)$^{-1}$,西段增加速率为0.71 ℃·(10a)$^{-1}$,最低气温增加速率呈现由东向西逐渐增加的趋势,其中西段增温幅度最大,60 a来平均低温增加幅度在6 ℃以上,由19世纪60年代初接近−16 ℃增加至接近−10 ℃,中段增加幅度接近4 ℃,由−14 ℃增加至−10 ℃左右,东段增温幅度最小,增温幅度约为3 ℃,由−9 ℃增加至−6 ℃。由5 a滑动平均曲线可以看出,祁连山东段、中段区域最低气温在1970年、1978年以及2010年均出现了显著上升的趋势,其中东段区域在2010年显著上升

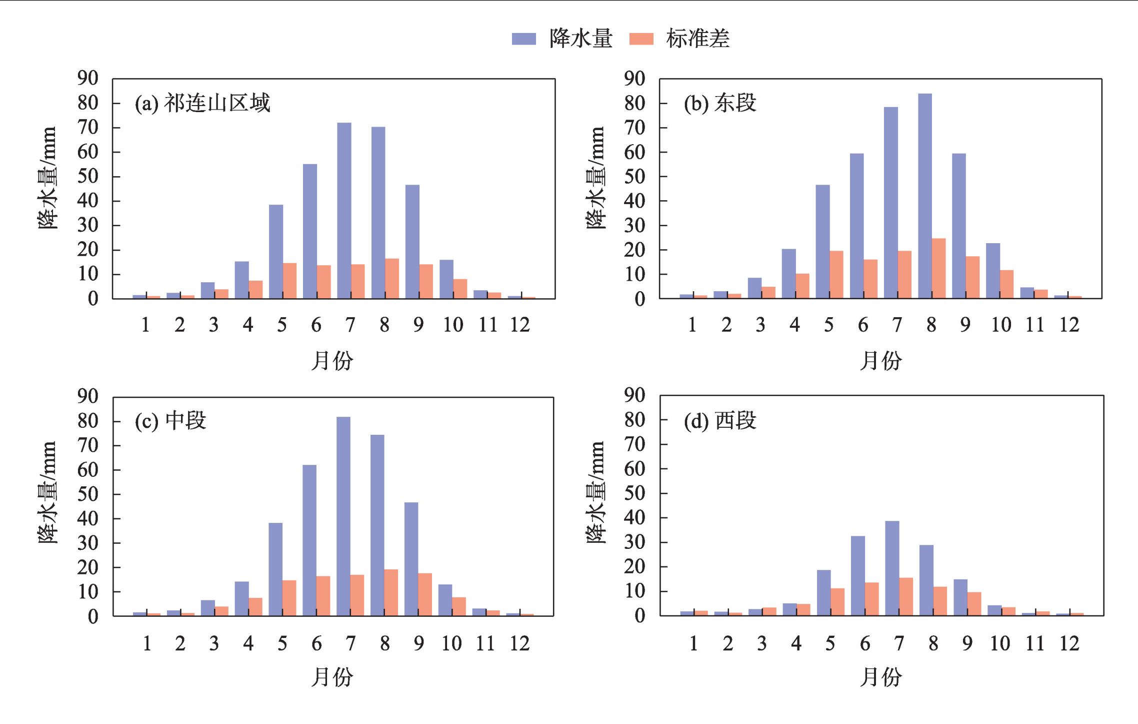
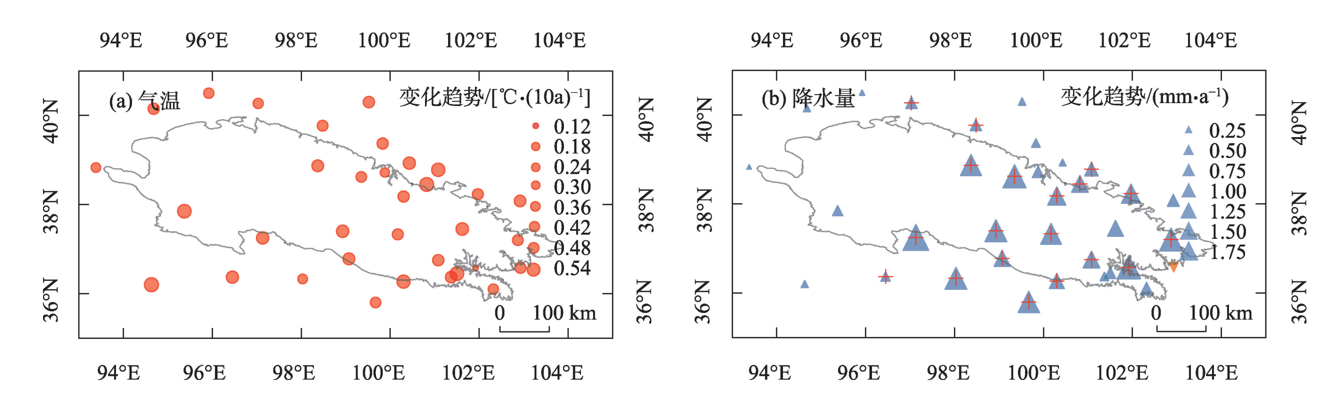


图4 1961—2022年祁连山不同区域逐月降水量及其标准差

Fig. 4 Monthly precipitation and its standard deviation in different regions of Qilian Mountains from 1961 to 2022



注：蓝/黄色箭头表示降水趋势增加/减少，红色加号表示降水趋势通过95%信度水平的显著性检验，所有站点的气温变化趋势均通过95%信度水平的显著性检验。

图5 1961—2022年祁连山及周边地区气温、降水量的变化趋势

Fig. 5 Change trend of temperature and precipitation in Qilian Mountain and surrounding areas from 1961 to 2022

表2 祁连山气温和降水增加倾向率

Tab. 2 Tendency rate of temperature and precipitation increase in Qilian Mountains

季节	祁连山地区		祁连山东段		祁连山中段		祁连山西段	
	气温增加倾向率/[℃·(10a)$^{-1}$]	降水增加倾向率/[mm·(10a)$^{-1}$]	气温增加倾向率/[℃·(10a)$^{-1}$]	降水增加倾向率/[mm·(10a)$^{-1}$]	气温增加倾向率/[℃·(10a)$^{-1}$]	降水增加倾向率/[mm·(10a)$^{-1}$]	气温增加倾向率/[℃·(10a)$^{-1}$]	降水增加倾向率/[mm·(10a)$^{-1}$]
全年	0.36	9.94	0.35	8.39	0.37	11.86	0.39	10.48
春季	0.3	2.01	0.3	1.91	0.31	2.38	0.29	1.6
夏季	0.32	5.76	0.32	4.04	0.32	7.38	0.33	7.21
秋季	0.35	1.87	0.32	2.04	0.37	1.88	0.39	1.42
冬季	0.45	0.3	0.44	0.39	0.44	0.22	0.5	0.25

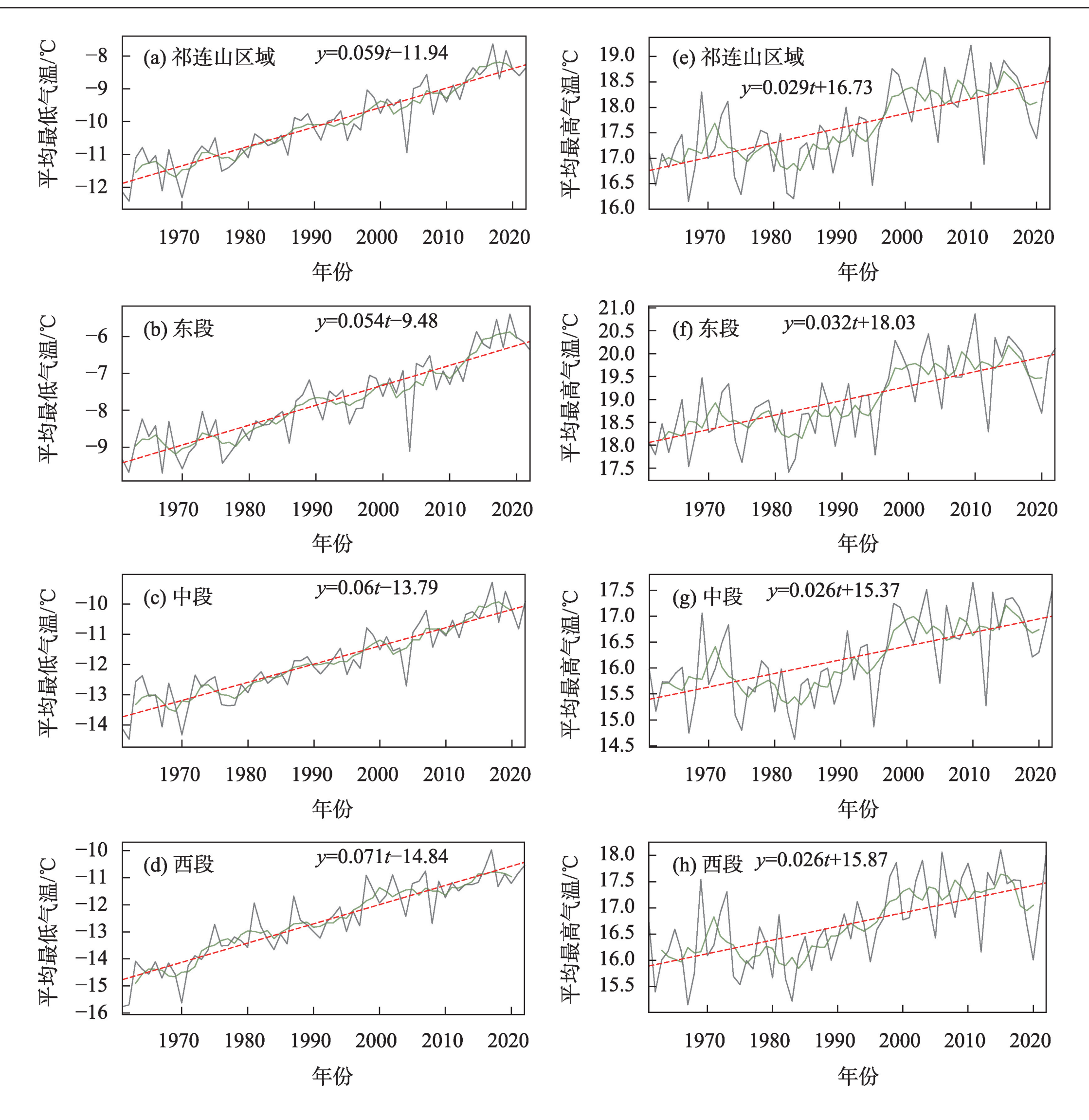


图6　1961—2022年祁连山不同区域最高最低气温变化

Fig. 6　Changes of maximum and minimum temperature in different regions of the Qilian Mountains from 1961 to 2022

的趋势最为明显，而西段区域呈现出较为均匀的波动上升的趋势。祁连山区最高气温也呈现上升的趋势，其中祁连山区域最高气温增加速率为0.29 ℃·$(10a)^{-1}$，祁连山东段增加速率为0.32 ℃·$(10a)^{-1}$，中段为0.26 ℃·$(10a)^{-1}$，西段增加速率与中段相同，所以，平均最高气温在祁连山东段增加最为明显，且平均最高气温在东段最高，在中段最低，与平均最低气温由东向西逐渐递减有所不同。整个区域增加幅度约为2 ℃，各个分区增加幅度差异不明显，但是与平均最低气温相比，其变化波动较大，增加幅度较小，从20世纪90年代中期才出现显著上升的趋势，并不像最低气温一样持续上升，而平均最低气温增加速率与平均气温在空间上分布一致，均自东向西逐渐增加，因此，最低气温的大幅上升是影响祁连山温度变化的主要原因，也会给祁连山地区生态和冰川带来影响。

4　祁连山气温和降水的垂直分布特征

祁连山区降水具有显著的垂直变化特征。为探究气温以及降水变化速率和海拔的关系，图7给出了34个站点的气温降水变化速率与海拔高度的线性关系。图7a表明，气温增加速率与海拔的关系为，1500 m以下的站点气温增加幅度在0.3~0.4 ℃·$(10a)^{-1}$之间，而在2000 m以上的站点，气温升高的速率在0.1~0.6 ℃·$(10a)^{-1}$之间，表明气温增加幅度最大的站点在高海拔地区，气温变化越不稳定。图7b表明，降水增加速率和海拔高度呈较明显的正相关关系，相关系数r=0.6，通过了95%的显著性检验，其中海

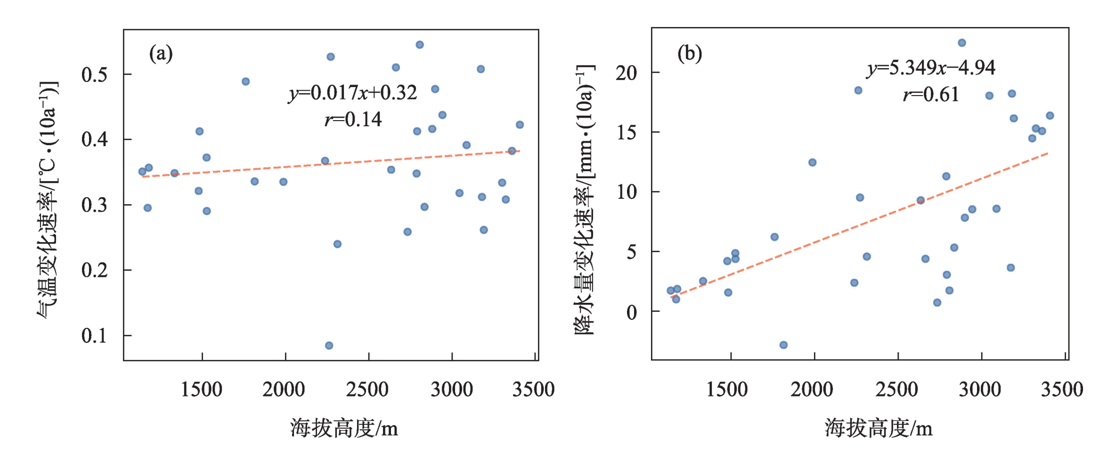


图7 祁连山及周边地区海拔高度与气温(a)、降水(b)变化速率的相关性

Fig. 7 Correlation between elevation of Qilian Mountains and surrounding areas temperature (a) and precipitation (b) change rate

拔高度在1500 m以下的站点观测到降水增加速率幅度为0~5 mm·(10a)$^{-1}$,而2000 m以上的站点降水增幅在0~25 mm·(10a)$^{-1}$,表明降水增加出现在海拔高度>2000 m的山区。

大量研究表明,山区降水存在最大降水高度带。为了探究祁连山降水量与海拔高度的关系,选取祁连山区内274个区域自动站,对2022年夏季降水量和海拔高度的关系进行分析。结果如图8所示,祁连山的站点主要分布在海拔高度2400~3800 m的范围内,海拔2200~2400 m站点降水量中位数最大,为最大降水出现的高度带,主要的降水量(中位数)随海拔高度减少,在3200 m又增加,极大值出现在2600~2800 m的高度带,在海拔3000 m以上极小值明显下降,极大值在3800 m达到峰值后递减,海拔2800 m降水量分布最为集中,随着海拔高度的增加降水量变化幅度增大,降水中位数以及极大值均呈双峰型分布。

为了进一步理解祁连山降水随海拔高度的变化规律。图9给出了祁连山几条主要山系迎风坡夏季降水量与海拔的关系。所有山系的降水量随海拔呈现出单峰型分布特征,其中花抱山降水量峰值出现在海拔3000 m处;而位于祁连山南部的青海南山降水量峰值出现的高度明显比其他山系偏高,最大降水量出现在海拔3900 m处,降水峰值超过300 mm;达坂山最大降水量出现在海拔2600 m处,降水量均比其他山系同海拔站点多,是所有山系中降水量最多的山系,冷龙岭降水量随海拔的分布呈现明显的单峰型分布,降水峰值出现在海拔2900 m处;靠近河西走廊的祁连山脉最大降水量出现在海拔3000 m处,最大降水量接近370 mm。可见,由于祁连山区不同山系迎风坡降水量随着海拔的分布有着较大的差异,导致了对水汽抬升作用的不同,从而导致了祁连山不同山系降水量最大值出现的高度不同。

祁连山区域自动站在高海拔地区分布较少,大部分站点海拔高度都位于海拔2400~3600 m的高

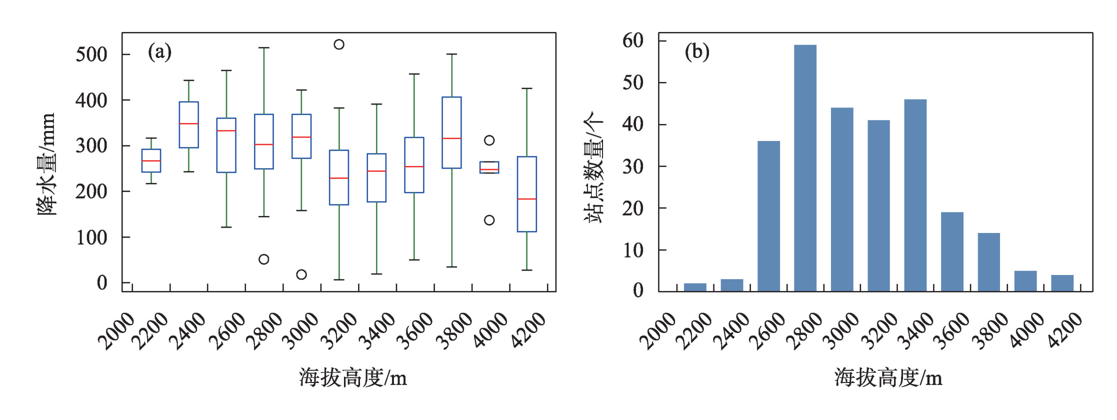


图8 祁连山区降水量随海拔高度的变化

Fig. 8 Variation of maximum elevation of precipitation in Qilian Mountain

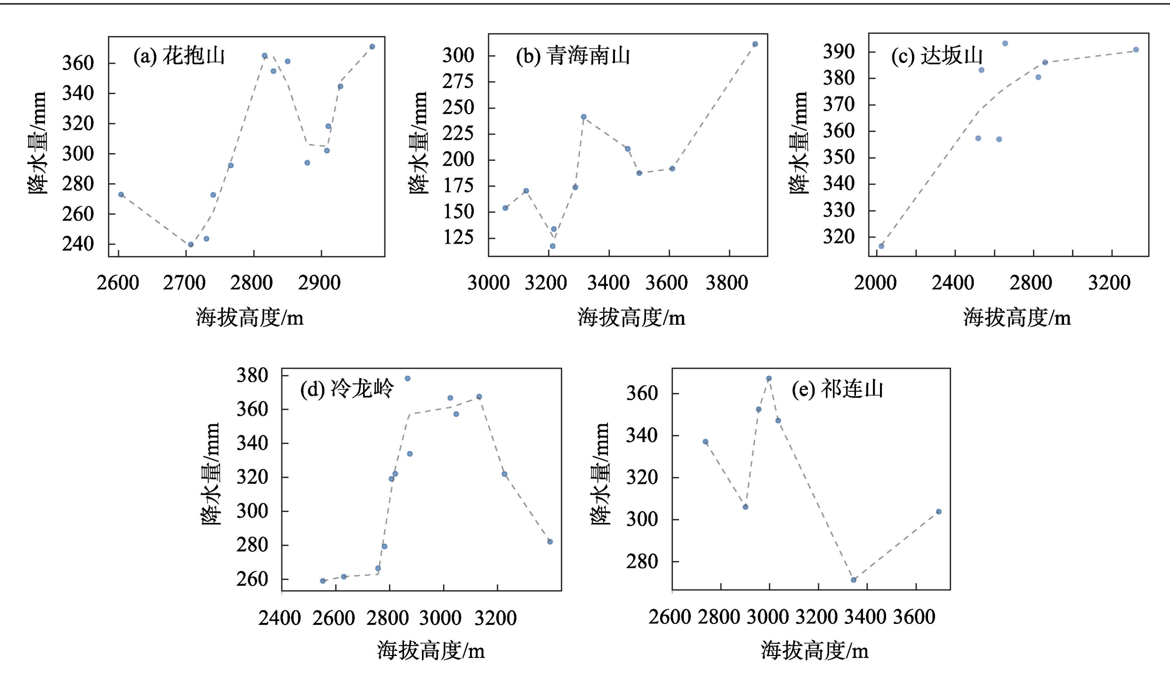


图9　祁连山区不同山系降水量和海拔高度的关系

Fig. 9　Relationship between precipitation and altitude of different mountain systems in Qilian Mountains

度,海拔高度3600 m以上站点分布较为离散,所以,在站点选取上受到了限制,从各个山系的降水量随海拔高度的变化图无法体现出图6中整个区域降水随海拔高度的变化特征。

结合祁连山气温降水标准差以及变化趋势的空间分布特征可以得出,整个祁连山地区气温降水年际变化大的区域和气温降水显著增加的区域是基本一致的。1961—2022年的60 a间,祁连山气温和降水均呈显著增加的趋势,祁连山中段北麓以及西段偏南区域气温增加显著,东段和中段南麓降水增加显著;降水增加速率和海拔有着显著的相关性,高海拔区域降水增加显著。

5　结论与讨论

近60 a来,随着全球气候变化,祁连山的气温降水也发生了显著上升和增加。本文通过对祁连山区气温降水的时空变化特征及其随海拔高度关系的研究,得出以下结论:

(1) 祁连山地区的气温和降水具有显著的时空差异,气候变化具有暖湿化倾向。祁连山中段区域气温年际变化最大,冬季气温年际变率最大。降水量由东向西递减,祁连山东段和中段降水年际变化最为显著,夏季降水量年际变化最大,冬季降水量年际变化最小。

(2) 祁连山气温增加速率约为0.36 ℃·$(10a)^{-1}$;春季升温速率最小[0.3 ℃·$(10a)^{-1}$],冬季升温速率最大[0.45 ℃·$(10a)^{-1}$];年平均最低温度比最高温度增加幅度大,最低气温在祁连山西段增加最为明显,最高气温增加在祁连山东段区域较为明显。最低气温的大幅上升是祁连山平均温度升高的主要原因。

(3) 祁连山地区的降水量在过去60余年呈现增加趋势[9.94 mm·$(10a)^{-1}$]。祁连山地区的降水量年内变化明显,降水主要集中在夏季,夏季降水量占全年降水的60%,月降水量8月最大,12月最小,月降水年际变化8月最大(25 mm·a^{-1}),由东向西不同区域内降水量和标准差有着明显的差异,祁连山东段月降水的年际变化最大(19 mm·a^{-1}),西段最小(16 mm·a^{-1})。

(4) 祁连山地区的降水增加率随海拔增加。夏季降水极大值出现在海拔高度2600~2800 m,在海拔高度3600~3800 m出现降水的第二个峰值,各个山系降水量随海拔呈单峰型分布,各个山系中达坂山迎风坡降水量最大,青海南山降水量最小。

由于祁连山地区地形以及气候类型比较复杂,观测站点分布不均,不能完全反应研究区的气候变化,尤其祁连山西段高山地带站点稀少,大部分站点建站时间较晚,缺少相应的观测数据,制约着对整个区域气候问题的研究,虽然在研究上进行分

区,但是由于研究本身的复杂性以及分区依据较难确定,对研究区的分区可能存在一些误差,区域自动站在高海拔地区分布较少,制约着降水与海拔关系的研究。

参考文献(References):

[1] IPCC, 2023: Sections[C]//Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023: 35-115.

[2] Yang J, Yang K, Zhang F, et al. Contributions of natural and anthropogenic factors to historical changes in vegetation cover and its future projections in the Yellow River Basin, China[J]. International Journal of Climatology, 2023, 43(14): 6434-6449.

[3] 王澄海, 张晟宁, 张飞民, 等. 论全球变暖背景下中国西北地区降水增加问题[J]. 地球科学进展, 2021, 36(9): 980-989. [Wang Chenghai, Zhang Shengning, Zhang Feimin, et al. On the increase of precipitation in the Northwestern China under the global warming[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(9): 980-989.]

[4] 王澄海, 杨金涛, 杨凯, 等. 过去近60 a黄河流域降水时空变化特征及未来30 a变化趋势[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 708-722. [Wang Chenghai, Yang Jintao, Yang Kai, et al. Changing precipitation characteristics in the Yellow River Basin in the last 60 years and tendency prediction for next 30 years[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 708-722.]

[5] Wang C. Climatology in Cold Regions[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2023.

[6] 王玉洁. 中国西北干旱区气候变化及典型流域影响适应研究[D]. 南京: 南京大学, 2017. [Wang Yujie. Research of Climate Change and in Arid Area of Northwest China and Its Impacts and Adaption on Typical Basins[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.]

[7] Zhang Q, Yang J, Wang W, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(1): 113-127.

[8] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(Z2): 3757-3771. [Zhang Qiang, Zhu Biao, Yang Jinhu, et al. New characteristics about the climatic humidification trend in Northwest China[J]. China Science Bulletin, 2021, 66 (Z2): 3757-3771.]

[9] 张红丽, 韩富强, 张良, 等. 西北地区气候暖湿化空间与季节差异分析[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 517-531. [Zhang Hongli, Han Fuqiang, Zhang Liang, et al. Analysis of spatial and seasonal variations in climate warming and humidification in Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 517-531.]

[10] 徐栋, 孔莹, 王澄海. 西北干旱区水汽收支变化及其与降水的关系[J]. 干旱气象, 2016, 34(3): 431-439. [Xu Dong, Kong Ying, Wang Chenghai. Changes of water vapor budget in arid area of Northwest China and its relationship with precipitation[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(3): 431-439.]

[11] 王澄海, 李健, 许晓光. 中国近50年气温变化准3年周期的普遍性及气温未来的可能变化趋势[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 126-136. [Wang Chenghai, Li Jian, Xu Xiaoguang. Universality of quasi-3-year period of temperature in last 50 years and change in next 20 years in China[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(1): 126-136.]

[12] 冯起, 李宗省, 王旭峰, 等. 祁连山生态变化评估报告[R]. 兰州: 中国科学院西北生态环境资源研究院, 2018: 74-76. [Feng Qi, Li Zongxing, Wang Xufeng, et al. Ecological Change Assessment Report of Qilian Mountains[R]. Lanzhou: Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, 2018: 74-76.]

[13] Wang L, Chen R, Han C, et al. Change characteristics of precipitation and temperature in the Qilian Mountains and Hexi Oasis, Northwestern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78: 1-13.

[14] 敬文茂, 任小凤, 赵维俊. 1965—2018年祁连山北麓及其附近地区气温与降水变化的时空格局[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 876-886. [Jing Wenmao, Ren Xiaofeng, Zhao Weijun. Spatio-temporal pattern variations of temperature and precipitation in Northern parts of the Qilian Mountains and the nearby regions from 1965 to 2018[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(4): 876-886.]

[15] 王士维, 孙栋元, 周敏, 等. 1951—2020年疏勒河流域气温时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1065-1074. [Wang Shiwei, Sun Dongyuan, Zhou Min, et al. Temporal and spatial variation of temperature in the Shule River Basin from 1951 to 2020[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1065-1074.]

[16] 蓝永超, 康尔泗, 张济世, 等. 祁连山区近50 a来的气温序列及变化趋势[J]. 中国沙漠, 2001, 21(1): 53-57. [Lan Yongchao, Kang Ersi, Zhang Jishi, et al. Air temperature series and its changing trends in Qilian mountains area since 1950s[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(1): 53-57.]

[17] 黄波. 祁连山地区降水的时空分布特征及数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012. [Huang Bo. Study on the Spatial and Temporal Distribution Characteristic of Precipitation and Numerical Simulation in Qilianshan Mountains, N. W. China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.]

[18] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 432-438. [Wang Keli, Jiang Hao, Zhao Hongyan. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 432-438.]

[19] Tian H, Yang T, Liu Q. Climate change and glacier area shrinkage in the Qilian mountains, China, from 1956 to 2010[J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(66): 187-197.

[20] 贾文雄. 近50年来祁连山及河西走廊极端气温的季节变化特征[J]. 地理科学, 2012, 32(11): 1378-1383. [Jia Wenxiong. Sea-

sonal variation of extreme temperature in Qilian Mountains and Hexi Corridor in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(11): 1378-1383.]

[21] 罗汉, 张强, 杨兴国, 等. 祁连山云降水特征及云水资源开发利用技术研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2023, 45(2): 368-381. [Luo Han, Zhang Qiang, Yang Xingguo, et al. Progress and prospect of cloud precipitation characteristics and cloud water resources exploitation and utilization technology in Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(2): 368-381.]

[22] 李岩瑛, 张强, 许霞, 等. 祁连山及周边地区降水与地形的关系[J]. 冰川冻土, 2010, 32 (1): 52-61. [Li Yanying, Zhang Qiang, Xu Xia, et al. Relationship between precipitation and terrain over the Qilian Mountains and their ambient areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32 (1): 52-61.]

[23] Chen R, Han C, Liu J, et al. Maximum precipitation altitude on the northern flank of the Qilian Mountains, northwest China[J]. Hydrology Research, 2018, 49(5): 1696-1710.

[24] 常学向, 赵爱芬, 王金叶, 等. 祁连山林区大气降水特征与森林对降水的截留作用[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 274-280. [Chang Xuexiang, Zhao Aifen, Wang Jinye, et al. Precipitation characteristic and interception of forest in Qilian Mountain[J]. Plateau Meteorology, 2002, 21(3): 274-280.]

[25] 张杰, 李栋梁. 祁连山及黑河流域降雨量的分布特征分析[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 81-88. [Zhang Jie, Li Dongliang. Analysis on distribution character of rainfall over Qilian Mountain and Heihe Valley[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(1): 81-88.]

[26] 高翔, 黄星星, 刘宽梅, 等. 祁连山自然保护区植被对气候变化的响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(1): 79-88. [Gao Xiang, Huang Xingxing, Liu Kuanmei, et al. Vegetation responses to climate changes in Qilian Mountain Nature Reserve[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2022, 58(1): 79-88.]

[27] 程瑛, 徐殿祥, 宋秀玲. 近50年祁连山西段夏季气候变化对冰川发育的影响[J]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 294-298. [Cheng Ying, Xu Dianxiang, Song Xiuling. Evaluation of the effects of summer climate change on glacier development in the west Qilian Mountains over the last 50 years[J]. Arid Zone Research, 2009, 26 (2): 294-298.]

[28] 尤联元, 杨景春. 中国地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2013. [You Lianyuan, Yang Jingchun. Geomorphology of China[M]. Beijing: Science Press, 2013.]

[29] 尹宪志, 张强, 徐启运, 等. 近50年来祁连山区气候变化特征研究[J]. 高原气象, 2009, 28(1): 85-90. [Yin Xianzhi, Zhang Qiang, Xu Qiyun, et al. Characteristics of climate change in Qilian Mountains region in recent 50 years[J]. Plateau Meteorology, 2009, 28 (1): 85-90.]

[30] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析[J]. 地理学报, 2008, 63(3): 257-269. [Jia Wenxiong, He Yuanqing, Li Zongxing, et al. The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mountains region[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(3): 257-269.]

[31] 王澄海, 张晟宁, 李课臣, 等. 1961—2018年西北地区降水的变化特征[J]. 大气科学, 2021, 45(4): 713-724. [Wang Chenghai, Zhang Shengning, Li Kechen, et al. Change characteristics of precipitation in Northwest China from 1961 to 2018[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(4): 713-724.]

[32] 蒋强, 魏林波, 李艳, 等. 基于高精度观测资料的2009—2019年祁连山地区降水特征分析[J]. 兰州大学学报（自然科学版）, 2022, 58(1): 89-98. [Jiang Qiang, Wei Linbo, Li Yan, et al. Analysis of precipitation characteristics in Qilian Mountains from 2009 to 2019 based on high precision observation data[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition), 2022, 58(1): 89-98.]

[33] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956. [Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of China over the past half century [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 942-956.]

[34] 宋世凯. 全球变暖背景下1960—2014年中国降水时空变化特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017. [Song Shikai. Spatial and Temporal Variation Characterristics of Precipitation over China During 1960-2014 under global warming[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017.]

Climate characteristics and variation in the Qilian Mountains from 1961 to 2022

YANG Fei, ZHANG Wentao, ZHANG Feimin, WANG Chenghai
(Key Laboratory of Arid Climate Resource and Environment of Gansu Province, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Global warming has resulted in the phenomenon of warming and wetting in northwest China. The Qilian Mountains is located in the arid region of northwest China, which spans the arid, semi-arid, and extremely arid climate zones from east to west. The climate has also obviously changed, which exerts a significant effect on the regional ecology and hydrological process. Based on the data of air temperature and precipitation in the Qilian Mountains and its surrounding areas from 1961 to 2022, this study analyzed the temporal and spatial variations of air temperature and precipitation in the Qilian Mountains and the relationship between precipitation and changes in precipitation with altitude. Results demonstrated a significant increase in temperature and precipitation in the Qilian Mountains in the past 60 years. The variation in temperature was the largest in the middle part of the Qilian Mountains, and the variation in precipitation was the largest in the east part of the Qilian Mountains, whereas the variation in precipitation was the smallest in the western part. The interannual variation in precipitation was the largest in August. The tendency rate of temperature increase in the Qilian Mountain area was approximately 0.36 ℃·$(10a)^{-1}$, which was higher than the national level of 0.21 ℃·$(10a)^{-1}$. The maximum temperature increase rate was observed in winter [0.45 ℃·$(10a)^{-1}$], particularly in the western region where it was 0.5 ℃·$(10a)^{-1}$. The maximum increase rate of precipitation was found in the middle region [11.86 mm·$(10a)^{-1}$]. Precipitation in the Qilian Mountains and surrounding areas increased with altitude, showing two peaks. One peak was located at an altitude of 2600−2800 m, and the other was located at an altitude of 3600−3800 m. However, the relationship between precipitation and altitude was generally unimodal for each mountain. Among the mountains, the windward slope of Daban Mountain had the largest precipitation, and Qinghai Nanshan Mountain had the smallest precipitation. The climate in the Qilian Mountains exhibited warming and humidification. The annual mean minimum temperature increased faster than the maximum temperature, and the minimum temperature increased most obviously in the western part of the Qilian Mountains. The rapid increase in the minimum temperature will exert an impact on the glaciers and ecosystems of the Qilian Mountains.

Keywords: air temperature; precipitation; climate change; spatio-temporal characteristics; change trend; Qilian Mountains